

音の伝わりを目でとらえる方法の研究

池田雄彦*

この報告では、視覚的にとらえる事が難かしい、小学校5年生の教材である「音」について、①空気中を音の震えが伝わる様子や、水中における音波の震えを目でとらえる方法。②手旗や発泡スチロールの粉末、発光ダイオードを使い、音の速さを目でとらえる方法。③表面波を利用した音のモデル実験など、小学生が活動しながら、音を目でとらえる簡単な方法を紹介する。

1. はじめに

小学校5年生の指導内容に「ア. 音は、空気、水などを伝わり、広がっていくこと。 イ. 音は物に当たると反射し、反射の仕方は物によって違いがあること。 ウ. 音の強さは、物の震える幅によって変わること。」がある。¹⁾ 内容のアに関連して、教科書等では空気が震えを伝えていることや、空気が震えていることを、震動板やロウソクの炎等で視覚的にとらえさせようとしている。しかし、これらの方法では、音が発音体を出てから耳に届くまでの過程、つまり震えの伝達や広がりを目でとらえるのに十分でない。また音の伝わる姿そのものを見ることは、音の速さや耳に聴こえる音波の波長の長さから考えて難しく、過去の研究を見ても定在波などを使った例²⁾はあっても、いまだ満足できるものはない。また、水中を伝わる音の様子については、ほとんど報告されていない。

そこで、この報告では、① 音は空気などの震えであること、② 音の震えが順次伝わる様子、③ 音の震えが広がる様子などを目でとらえる方法、および水中における音の震えを目でとらえる新しい方法を紹介する。これらの開発・改良にあたっては、小学生にも原理がわかり、意欲をもって活動できること、作り方や材料の入手が簡単で、すぐ現場で生かせることを念頭においた。

2. 音はなぜ目でとらえにくい

(1) 音速の問題

体積弾性率 k 、密度 ρ の流体中を伝わる音の速さ c は次式で与えられる。³⁾

$$c = \sqrt{k / \rho} \quad \dots\dots\dots ①$$

空気中を伝わる音の速さは、温度によっても変化するが、空気中では約340 m/s (20℃) で仮に、音が目で濃淡として見えたとしても、教室などの狭い空間では「音」は瞬時に通過する。このため、人の目で止めて見ることはできない。水中における音の速さは、約1500 m/s (20℃) でさらに困難となる。

(2) 波長の問題

振動数 f 、速さ c の音波の波長 λ は次式で与えられる。

* 理科長期研修員 (両津地区理科教育センター・外海府中学校)

$$\lambda = c / f \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

私達が普通耳にする音は、15 Hz ～ 20,000 Hz⁴⁾ であるが、声として発する音は、普通の状態では100Hz前後から300Hz⁴⁾の範囲なので、この波長はおよそ4～1m（20℃）となる。波長がいかに長いかわかる。このことから考えて、児童の発した音波の疎密状態が見え、音を静止させることができたとしても、波長が長い大型の装置が必要となり、教室内で実験することは簡単でない。水中では①式、②式より、一定振動数では、波長はさらに長くなり空気中のおよそ4.4倍となる。このため困難はさらに増す。

(3) 音波による媒質の振れ幅の問題

音波中では、空気など音を伝える媒質の粒子（分子）の振れ幅（震えの幅） ξ （m）は

$$\xi = \sqrt{\frac{2J}{\rho c}} \times \frac{1}{2\pi f} \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{3}$$

で与えられる。³⁾ここに J は音の強さ（W/m²）、 ρ は密度（kg/m³）である。我々が普通会話で耳にする程度の音の強さ（ 1×10^{-6} W/m²）では、振れ幅は極めて小さく $f = 1000$ Hzで 1×10^{-8} m（ 1×10^{-6} cm）程度であり、この動きは肉眼でとらえられる範囲でない。水中では同一条件で、その振れ幅は空気のおよそ61分の1となる。

以上(1)～(3)の条件からわかるように、音を目でとらえることは難しいことになる。まして水中では、いずれの条件でも桁違いに難かしさをます。

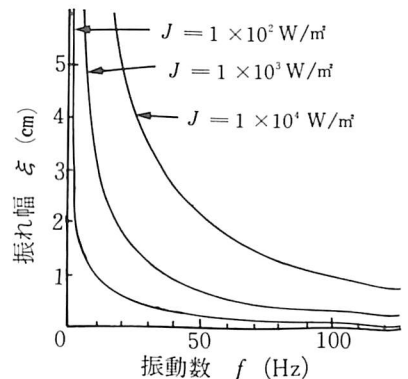


図1 振動数と振れ幅の関係

3. 「音の伝わりを目でとらえる」方法の工夫

(1) 音波による媒質のふるえを見る方法

(a) 実験 1-1 発泡スチロールの粉末を入れた伝令管を使い、音を目でとらえる実験

(ア) ねらい

音を伝える空気は震えていることを、空間的な広がりの中でとらえさせる。

(イ) 原理

太鼓の近くのなめらかな机上に、発泡スチロールの粉末（大根のおろし金ですったもの）をおくと、太鼓を強くたたくごとに粉末が小刻みに震える。これは太鼓に近い空気の粒子が音波により震え、この時、粉末を一緒に動かしたためである。音波による、この震えを大きくする工夫をすれば、発泡スチロールの粉末がより激しく動くことになる。③式より、振れ幅 ξ を大きくするには、 J 、 ν 、 ρc を次のようにすれば良いことがわかる。

- J の値を大きくする ……大声でどなった音を狭い伝令管の中に集中させる。
- f の値を小さくする ……出来るだけ低い声を出させる。
- ρc の値の小さい媒質を使う ……空気を媒質に使い、音を伝える。

例えば図1より $J = 1 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $f = 20 \text{ Hz}$ の音波では, 空気の流れ幅は $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1.6 cm) となり, この振れ幅を反映した発泡スチロールの動きも目に見えるようになる。

(ウ) 方法

図2に示す装置を用い, 教室と廊下, 又は他の教室との間で電話ごっこをさせる。他の子供には透明なビニールホースの中の発泡スチロールの粉末の動きに注目させる。声を強く発するたびに粉末が震えるのがわかる。途中ホースを折ると音が聞こえず, その先の粉末は震えなくなり, 音を伝える空気が震えることが確かめられる。

(エ) 留意事項

- ・この装置では, 息による空気の流れの影響をなくするため, 敏感に振動するコンドームの膜を用いた。サララップ・ゴム風船・ビニールの膜でも代用できるが, 性能的に劣る。膜の張り方は低音域でより効果を出すため, 膜の表面のしわが消える程度がよく, 極端に強すぎても弱すぎても効率が悪い。

- ・膜の口径は大きい方が効率のよいことから, 紙コップは大き目のものを使うとよい。

- ・音を出す時, 集音装置に口をつけ, 低くどなるような声で「ドーン・ドーン」と太鼓の音を真似るか, 又は「ル・ル・ル」と力強く連続音を出すとよい。音声の中の低周波の成分によって, 発泡スチロールの粉末が, その場で震えるか, 激しく動く。

- ・ゆっくり息を吐いたり, 吸い込んだりすると, 発泡スチロールの粉末が激しく動くが, これは③式で振動数 f が極端に小さくなり, このため振れ幅 A が大きくなったためである。

- ・ホース内に発泡スチロールの粉末を入れる時は, ホースの一方から吸い込むようにすると, 簡単に平均して粉末がホース内に分布する。

(b) 実験 1-2 水中においた気泡で, 水を伝わる音の震えを目でとらえる実験

(ア) ねらい

空気ばかりでなく, 水も音を伝えること, 及び水中を伝わる音の震えを見る。

(イ) 原理

水中にスピーカーを入れ, すぐ近くに手をおくと, 水を通して震えを感じる。この音波の圧力変化に敏感に反応するものとして気泡がある。水の中に気泡を閉込めれば音波を発することに, 気泡の震えが見られるはずである。

(ウ) 方法

アクリルの水槽に, ギョム膜を張った三角漏斗を2個つけて, 電話遊びをしながら, 図3に示すような方法で, 水も音を伝えること, 水も音の震えを伝えることを確かめる。

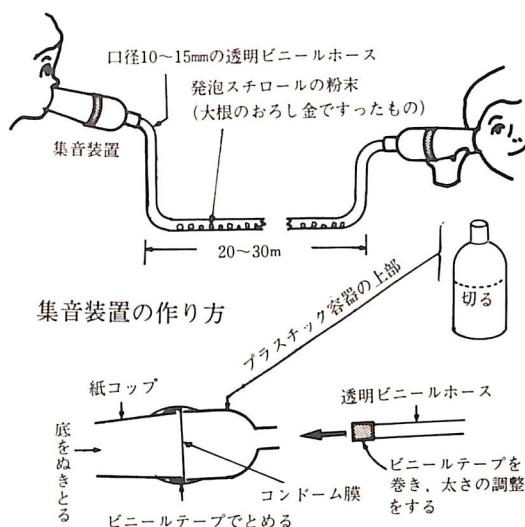


図2 空気の震えを見る実験

- ①………空気は、音を伝え、音を伝えた時震える（吊り下げたり ボンの動きより、震えを知る。）。
 ②, ③…水も音を伝えることができる。そして音の震えを伝えることができる。

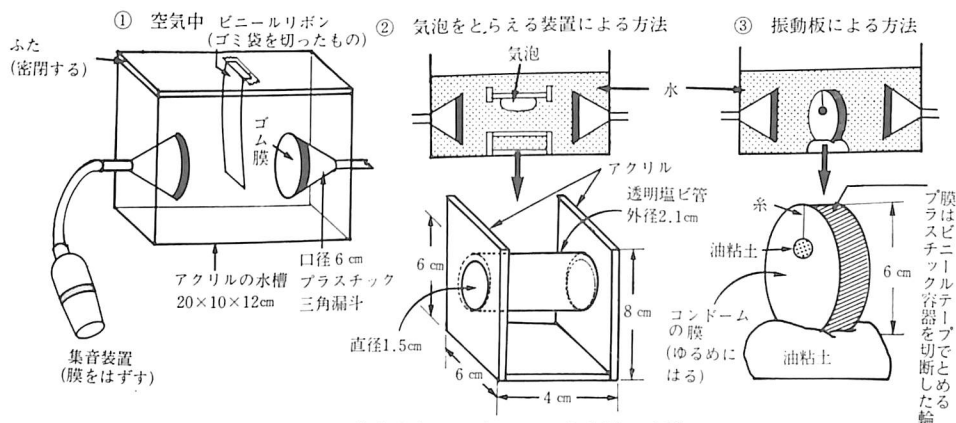


図3 水中を伝わる音のふるえを見る実験

(エ) 留意事項

- ・ゴム膜はコンドームが良く、他の膜では①の電話遊びの時、聞こえないことがある。①～③で、音が聞きとりにくい時、集音器をはずし、ビニールホースを直接耳につけると、よく聞こえる。
- ・②で気泡をとらえる装置を静かに水に入れたら、気泡が管内に溜まる。気泡の震えが悪い時は、気泡の大きさや深さを変えれば良い。気泡の大きさを変えるにはスポイトで空気を送ると簡単である。

(2) 音の伝わる様子とその速さを目でとらえる方法

教科書等では、音の速さについてふれていない。しかし、音の伝わりが空気の震えであることが分かった段階で、この震えが順に伝わっていくことを理解させるため、音の速さを定性的にとらえさせることは非常に有効であると考えられる。

(a) ねらい

空気中を音の震えが順に伝わること、及びその速さの目安を目でとらえさせる。

(b) 原理

音の速さは大きいので、音の進む速さを肉眼でとらえさせようとする時、目の残像時間から速さの差を認めるには距離を延ばさねばならない。残像時間は0.05～0.1秒⁶⁾とすれば、音の進んだ距離にして18m～34mに相当する。つまり速さを目でとらえるには34m以上距離をとって実験すればよいことになる。

(c) 実験2-1 ピストルの音を聞き旗を下ろすことにより、音の速さを目でとらえる実験[※]

(ア) 方法

- ・クラスの児童の半数を等間隔で一列に並ばせ、目をつぶらせて、手に持った旗を上げさせる。ピストル（運動会スタート用の信号）の音が聞こえると同時に旗をおろさせる。
- ・残りの児童はできるだけ遠くから観察させる。距離がとれない時には、図4のB付近で、旗を持った全員をできるだけ小さな視角で見える位置から観察させる。旗を下ろす順と速さから、音の伝わる順序と音の速さがわかる。

※ この研究をまとめている段階で、類似の方法の報告⁶⁾がなされたが、細かな点で手法が異なる。

(イ) 留意事項

・音を聞いてから旗を下ろすまでの反応には個人差がある。差を少しでも無くするため、音を聞くと同時に旗を下ろす手法をとった。写真判定によれば、20m間隔以上から、旗が順に下ろされることが認められた。（図5）

・児童の目で観測した場合、観測位置によっても違うが、旗を持つ児童の間隔は40mから「旗が順に下りた」と確認でき始めた。この値は原理で述べた残像時間を考慮した距離と一致する。5回とも旗を下ろす順がはっきり認められたのは間隔が80mからである。（表1）

・列は長ければ長いほど良いが、最低120mはほしい。

道路や田のあぜ道等を利用するとよい。



図5 児童の間隔20mの時の実験

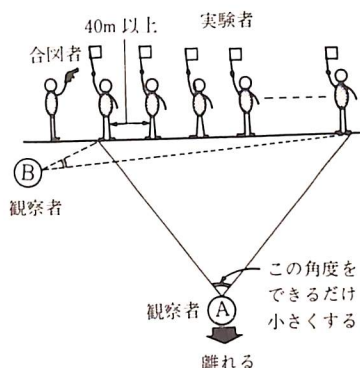


図4 手旗で音の速さを見る方法

表1 観測者から見た旗を下ろす順

間隔	列の長さ(m)	順に見えた回数	同時に見えた回数	順が逆転した回数	合計
10	70	0	3	2	5
20	140	0	5	0	5
40	120	1	4	0	5
70	140	3	2	0	5
80	80	5	0	0	5
90	90	5	0	0	5

・実験者 両津小学 4年生・5年生 12名
 ・観測者(Bの位置) 同上 5年生 3名
 ・回数は3人がそろって見えたと認めた回数

(d) 実験2-2 発泡スチロールの粉末を入れた伝令管を使い、音の速さを目でとらえる実験

(ア) 方法

実験1-1と同じ装置で、発泡スチロールの粉末を入れた透明のビニール・ホースを60m以上の長さで延長し、ホースの初めと終りに近い部分を並べ、この部分の粉末の動きを全員で注目する。

実験1-1の要領で、一声「ドン」とさけぶと、粉末の震えが遅れて伝わるのが観察できる。同様にして電話遊びをさせると、音の遅れを耳でも確かめられる。

(イ) 留意事項

・ホースは長いほど、粉末の震えの遅れがはっきりする。しかし長くなるにつれ減衰も大きくなり、音が聞き取りにくくなる。ホースの間に塩ビ（塩化ビニール）の水道管（内径13mm）を接続すると、距離が伸ばせる。実験では、50mの水道管をはさんで、100mの長さ（12℃）でも可能であった。

・ビニール・ホースを使う時、気温が低いほど、音の減衰が少なく、実験しやすい。

・震えの遅れだけを目でとらえるには、50mの塩ビの水道管の両端に、図6のようなシャボン膜をつけた感音器

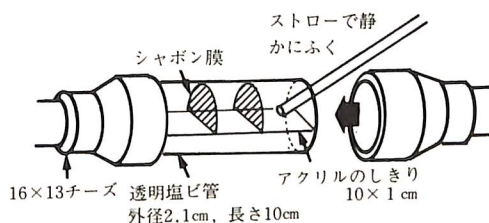


図6 ショッポン膜感音装置

をホースでつないで取り付け、OHPで拡大投影する。空気の震えに、シャボン膜が敏感に反応し、震えの遅れが良くわかる。

・塩ビの水道管やホースの接続には、水道工事用のチーズやエルボを使うと簡単である。

(e) 実験2-3 発光ダイオードの点滅より、音の速さを目でとらえる実験

この実験は、学校の環境で、広い場所がとれない場合の実験2-1の別法である。

(a) 方法

図7のように、ラジオカセット(ラジカセ)にマイクを接続、モニターまたはイヤホン端子に発光ダイオードを接続したものを2組用意する。マイクは出来るだけ離して置く。ラジカセを拡声状態にしてから、ピストルまたは太鼓の音を強く発する。この時、発光ダイオードがマイクに近い順から光る。

(i) 留意事項

・遠い所に置くマイクは望遠マイクを使うと距離を長くとれる、ない時は、ビニールのこうもり傘を利用し集音装置を作る。

・実験によれば、2つのマイクの間隔は、30mあれば発光順が判定できる。目がちらつきを感じる周波数(臨界融合周波数)は $1/15 \sim 1/25$ 秒⁵⁾で、音の進む距離にして14~23m(20℃)に相当し、実験結果もこれに近い値を示した。

・遠いマイクの感度を上げ過ぎると、反射音や雑音を拾い易いので、音量を調整する必要がある。この時、両方の発光ダイオードの明るさを同じにする。

・発光ダイオードは、市販されている100円未満で、Red.の丸型のものが良い。(このダイオードはおよそ1Vで発光する。)

(3) 表面波を用いたモデルにより、音の広がり・伝わる様子、及び音の性質を目でとらえる方法

音のまとめの段階で、液体の表面波を用いた音のモデルにより、音の広がりを初めとする音の諸性質を目で確かめる時使用する。

(a) ねらい

自分の声でできた波を使い、次の音の諸性質を目でとらえさせる。

- ・音は順に伝わる。 ・音は伝わる時広がる。 ・遠ざかると音は弱まる。 ・音にも影が出る。
- ・ついたての後にも音は回り込むことがある。 ・音は反射する。 ・音は集められる。
- ・強い音ほど振れ幅は大きい。

(b) 原理

液体の表面に振動を与えると、液体の表面に波が出来る。波の波長が十分短い場合、できた表面波の波長 λ は、次の④式で与えられる。⁷⁾

$$\lambda = [2\pi T / \rho f^2]^{1/3}, \text{ここに } T \text{ は表面張力である。} \dots\dots\dots \text{④}$$

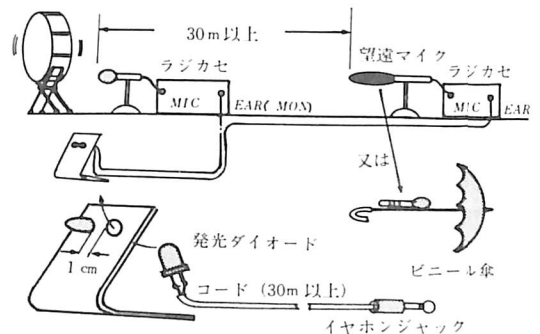


図7 発光ダイオードで音の速さを目でとらえる実験

④式より計算した結果をグラフにしたものが、図8で、実験結果をよく再現している。また波の速さ c は次式で与えられる。⁷⁾

$$c = \sqrt{\frac{2\pi T}{\rho \lambda}} \dots\dots\dots ⑤$$

④、⑤式から求めた値を、空気中を伝わる音と比較すると、表2のようになり、表面波は、波長・速さとも、空気中のおよそ1/1000となり、小さな容器内で実験すれば、体育館や教室における音のモデルとなる。

水の表面波は、実験条件により、あまり遠くまで届かず消えてしまうことがある。これは水の動粘度 ν (粘度を η とすると $\nu = \eta / \rho$) が大きいいため、波のエネルギーが水に吸収されやすいためと考えられる。そこで、表面波を遠くまで届けるにはこの動粘度の小さい液体を使えばよい。身近かなものではメチルアルコールの ν が小さい。実際、メチルアルコールの波は、水より遠くまで届く。

(c) 実験3-1 児童用表面波実験装置で音の性質を目でとらえる実験

(ア) 方法

解剖皿または写真のバットなど、底の白い容器に、図9のように、漏斗にゴム膜をつけ、膜の1/3近くまで水を入れる。集音装置(膜をはずす)に向かって、「ドン・ドン」又は「バン・バン」と連続音を発すると、表面波が観察できる。この時、表面波を音波にたとえて「音は順に伝わる。」「伝わる時広がる。」「遠ざかるほど音は弱まる。」等の現象が観察できる。発生する音を強くしたり、弱めたりすると「音の強さは物の振れ幅によって変わる。」ことがわかる。

容器中に図8の①～③のように、つい立てを配置すれば、次のようなことが、目でとらえられる。

① 前に何かあると、音の影ができる。前にあるものが小さいと、音は回り込む。

② 音は反射する。

③ 音は集めることができる。

(イ) 留意事項

・この実験は、波の影を見るようにすると観察しやすい。

影ができない時は、懐中電灯で上から照らすと良い。また、メチルアルコールを使用すると、波の反射現象などが、より見やすくなる。

(d) 実験3-2 演示実験で表面波を使い、音の性質を目でとらえる実験

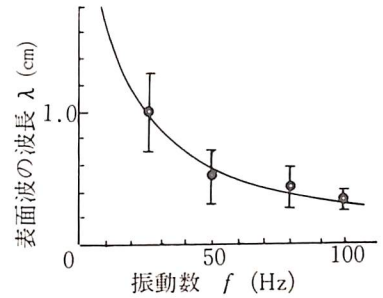


図8 振動数と表面波の波長との関係

表2 音と表面波の比較(100 Hz, 20°C)

		速 さ (cm/S)	波 長 (cm)
空気中の音		34,200	342
表面波	水	36	0.36
	メチルアルコール	26	0.26

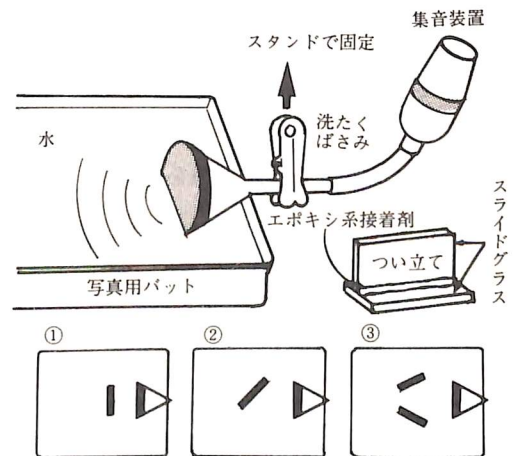


図9 表面波を使う実験(児童用)

(ア) 方法

表面波は、OHPで投影すると、波の動きが観察しやすい。この時、実験3-1をアクリルの水槽の中で行っても良いが図10のように、自動車のスプレー式ワックスを塗ったスピーカーの一部を、メチルアルコールに入れ、マイクで話すと、よりきれいに見やすい表面波が発生する。この水槽内に、実験3-1で使ったつい立てを置けば、表面波を音波にたとえて、音の諸現象を目で見られる。

(イ) 留意事項

- ・スピーカーの特性によっても異なるが、スピーカーは一般には、口径の大きいものほど表面波が出やすく、又アルコールにつける部分を少なくすると、きれいな波ができる。
- ・出力を上げ過ぎると、きれいな波が観察できないので、コーンが水をはじく寸前に、音量を調節する。
- ・スピーカーをアルコールや水に入れたくない時、ビニール袋に入れてもよいが、複雑な波が発生しやすいので、図11のように薄い金属板の造波装置を取り付けばよい。

4. おわりに

ここで紹介した方法によって、従来の方法では不十分であった音の連続的な広がり、音が順に伝わって行く様子、及び水中での音波の震えなどを目でとらえることができる。

しかし、この研究では、実験の手法を考案や改良しただけで、これらを導入した、授業実践を試みていない。いかに、この素材を教材として、授業の中に持ち込むかと言う、大きな課題が残っている。

参考文献

- 1) 文部省：小学校指導書，理科編，13版，大日本図書，(1981)
- 2) 実吉純一ほか：超音波技術便覧，日刊工業新聞社(1960)
Wiston E. Kock (藤岡由夫 訳)：音波・光波・電波，再版，河出書房(1981)
- 3) 小橋豊：基礎物理学選書4，音と音波，13版，裳華房(1982)
- 4) 五十嵐寿一：実験物理学講座9，音響と振動，初版，共立出版(1968)
- 5) 図説科学大系8，音光熱，初版，平凡社(1964)
- 6) 中村啓次郎：音と光，初版，新生出版(1982)
- 7) N. F. Barber (高橋毅 訳)：水の波，初版4刷，共立出版(1979)

ここで報告した装置の寸法は一応の目安であり、この大きさに限定されるものではない。

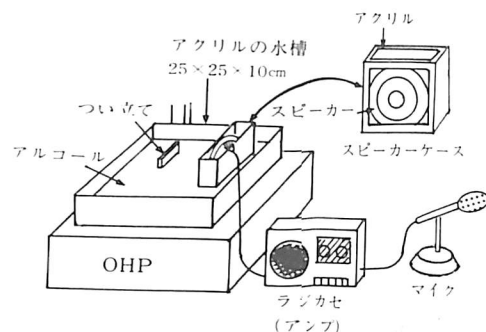


図10 表面波を使う実験 (演示用)

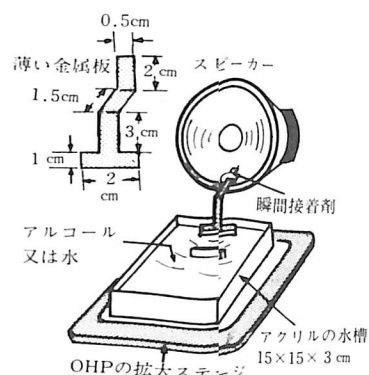


図11 スピーカー 取付け造波装置



図12 実験3-2の方法による表面波